

钢—混凝土组合梁疲劳性能试验研究进展

卜建清¹, 张吉仁²

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:钢—混凝土组合梁在桥梁结构中的应用日趋广泛,由车辆作用引起的疲劳问题日益突出。为进一步揭示钢—混凝土组合梁的疲劳性能与机理,该文首先回顾组合梁疲劳试验方案的发展历程,分析组合梁疲劳性能的影响因素与疲劳破坏形态,对新型组合梁疲劳性能试验研究的进展情况进行总结,整理组合梁混凝土板疲劳试验的研究进展,总结有限元疲劳分析的应用现状,并提出目前研究的不足及下一步研究的方向。

关键词:钢—混凝土组合梁; 疲劳性能; 疲劳试验; 破坏形态; 有限元

中图分类号: U448.21+6

文献标志码: A

钢—混凝土组合梁是由外露的钢梁截面或钢桁架梁截面通过连接件与钢筋混凝土板结合而形成的组合结构^[1]。因为钢—混凝土组合梁桥在服役期内要承受车辆荷载的循环作用,尤其是超载车辆作用,会加剧桥梁的疲劳破坏,加速桥梁结构的锈蚀、开裂等损伤,影响其自身的安全性与耐久性^[2]。钢—混凝土组合梁的疲劳问题主要是承受反复拉应力的钢梁以及承受重复反向剪应力的连接件的疲劳问题,国内外学者通过疲劳试验及数值仿真等手段对组合梁疲劳问题进行了深入研究,取得了一系列成果,钢—混凝土组合梁抗疲劳设计已形成计算方法体系,国内外规范也有比较完整的规范条文^[3],该文对国内外钢—混凝土疲劳性能试验的研究成果进行整理、分析,以期对钢—混凝土组合梁疲劳问题的相关研究提供借鉴。

1 钢—混凝土组合梁疲劳试验研究

由于连接件是组合梁中的关键部件,早期学者主要是通过连接件推出试验研究组合梁的疲劳性能。T. M. Toberts 等通过试验发现组合梁内栓钉的疲劳性能要高于推出试验中栓钉的疲劳性能^[4],仅以推出试验对栓钉进行疲劳分析不足以反映其在组合梁中的真实受力状态,由于组合梁桥面板、连接件与钢梁会产生应力循环,其平均应力可能远小于屈服强度,但仍会产生疲劳破坏,因此国内外学者便以组合梁为研究对

象,进行疲劳试验,取得了一系列成果。

1.1 钢—混凝土组合梁疲劳试验方案

组合梁疲劳试验方案主要包括试件设计、加载方案、测试内容等,其中由于试验目的不同,在试件设计和测试内容上均呈现出差异性,不同试验的加载方案变化不大,随着技术的进步,试验装置的功能逐步趋于完善,试验精度也越来越高。

疲劳试验装置涉及试验反力装置、针对不同试验项目加工的工作装置以及试验加载设备,其中反力装置主要由反力架、反力墙等组成,试验工作装置是临时加工的结构或构件,试验加载设备是荷载施加装置^[5]。早期的加载装置是液压疲劳机。其工作原理是将千斤顶施加的荷载由分配梁传递至加载点处放置的垫梁上,荷载通过与千斤顶相连的测力传感器读取,与其配套的数据采集设备主要有静、动态应变仪、挠度传感器等。随着试验设备信息化、智能化程度的不断提高,目前试验加载设备主要有脉动疲劳试验机测控系统和电液伺服结构动态试验系统,可将试验力、位移变形测量、试验次数、试验曲线等通过软件界面集中处理,试验精度均能达到 $\pm 1\%$,疲劳试验加载方式多采用跨中单点加载与跨中对称加载,疲劳荷载形式为等幅正弦波,荷载幅值上限一般根据组合梁极限承载力和加载设备上限值来确定,荷载幅值下限主要由加载设备决定,随着试验力、位移、变形全闭环控制系统的进一步研究,荷载下限值的稳定性会逐步得到保证^[5]。

收稿日期:2022-08-29(修改稿)

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(编号:E2013210104);河北省重点研发计划项目(编号:19275405D);石家庄铁道大学研究生资助项目(编号:YC2020012);河北省高等学校科学技术研究项目(编号:Z2020203)

作者简介:卜建清,男,博士,教授, E-mail:927288223@qq.com

疲劳试验在试验前均要进行预静载试验和静载试验,设置静载试验梁,采取分级加载的方式逐级施加荷载并卸载,目的是结合理论分析估算疲劳荷载上限值,以及了解组合梁的静力特性,为疲劳试验提供参考。疲劳试验流程如下:调节计数器→开动试验机(待机器运转达到正常状态)→加最小荷载调节加载频率→加最大荷载→反复调节最大、最小荷载到规定值。荷载试验过程中应保持荷载的稳定性,根据试验机的控制能力所加荷载的误差不超过最大荷载的3%^[6]。

1.2 钢-混凝土组合梁疲劳性能影响因素

组合梁疲劳性能影响因素众多,应力幅、抗剪连接度及混凝土板疲劳强度是组合梁疲劳性能的主要影响因素,其他因素如运营环境、施工方式等都对组合梁的疲劳性能有不同程度的影响。

Krige G J 和 Mahachi J 试验研究^[7]表明:栓钉剪应力幅是影响组合梁疲劳性能的主要因素,应力幅值越大,组合梁疲劳寿命越短,并且当荷载上限超过极限承载力的50%时,组合梁无法承受任何幅度的疲劳荷载,这说明除了控制荷载幅值外,还应控制荷载的上限值。Predro Albrecht^[8]为加载点中间的钢梁受拉侧焊接了盖板,使得疲劳破坏发生在盖板与钢梁焊接端部处。试验结果表明:当栓钉不发生疲劳破坏时,钢梁与盖板焊接部位的应力幅值与应力比值对组合梁疲劳寿命的影响最大,并给出了盖板端部与钢梁受拉翼缘的疲劳寿命计算公式如下:

$$R=0;\lg N=17.267\ 8-5.748\ 3\lg\Delta\sigma\tag{1}$$

$$R=-1;\lg N=16.258\ 4-4.952\ 2\lg\Delta\sigma\tag{2}$$

式中:R为应力比值;N为疲劳寿命;Δσ为正应力幅值。

彭国荣、李建军等通过对部分抗剪连接钢-混凝土组合梁进行疲劳试验,证明了栓钉剪应力幅依旧是影响组合梁疲劳性能的主要因素,栓钉应力幅越大,组合梁疲劳寿命越短,并通过试验数据拟合,给出了组合梁疲劳寿命的计算式^[6,9]:

$$\lg N+6.488\ 1\lg\Delta\tau=18.695\tag{3}$$

式中:Δτ为剪应力幅值。

组合梁的抗剪连接度是指在一个剪跨范围内,结合面上抗剪连接件数量的相对值,它反映了组合梁结合面上连接件的抗剪承载力与混凝土翼板(或钢梁)截面的压(或拉)力之间的平衡关系^[1]。已有试验表明^[10-11]:采用完全抗剪连接的组合梁,截面刚度退化慢,由滑移效应产生的残余应变较小,其疲劳性能优于采用部分抗剪连接的组合梁。Ayman El-Zohariy^[12]等通过试验研

究表明,抗剪连接度在控制混凝土面板的纵向疲劳裂纹中起重要作用,当组合梁采用部分剪力连接时,栓钉周围混凝土破碎会导致组合梁疲劳寿命缩短。

混凝土板的疲劳强度对组合梁的疲劳性能也有影响,原因是混凝土板中裂缝发展极易导致组合梁的疲劳破坏。已有研究^[10,13]表明:混凝土疲劳强度主要受配筋率、混凝土抗压强度、施工方式的影响,提高配筋率与混凝土抗压强度、配置预应力筋以及采用现浇施工可显著提升组合梁的抗疲劳性能。芜湖桥组合梁工程疲劳试验结果^[14]表明:采用两种混凝土组合的试验梁其抗疲劳性能优于高配筋率的钢-混凝土组合梁,两种混凝土采用齿状咬合使结合面处基本无裂缝产生,这一研究为控制混凝土板开裂提供了新思路。Ayman El-Zohariy 等^[15]对采用外部后张预应力筋的组合梁进行疲劳试验,研究表明,外部后张预应力筋可显著提升组合梁的抗疲劳性能。

其他因素如加载位置、低温、栓钉锈蚀等对组合梁疲劳性能均有不同程度的影响。Youn Seok-Goo 等^[16]考虑了荷载沿梁横向位置的变化,对1:5的组合梁桥缩尺模型进行疲劳试验表明:当荷载加在桥面板中部时,组合梁疲劳寿命比加在靠近支座时高,在疲劳试验中荷载工况应尽可能符合结构的实际受力状态;侯文崎等^[17]考虑到组合梁在青藏铁路应用中面临的低温疲劳问题,利用低温加载设备,对10根试件进行低温疲劳试验。结果表明:低温中组合梁的疲劳寿命更长,且温度越低,组合梁抗疲劳性能越好;张海鹏等^[18]对4根不同栓钉锈蚀率的组合梁进行疲劳试验,试验结果如表1所示。

表 1 试件锈蚀率和疲劳寿命^[18]

试件编号	锈蚀率/%	疲劳寿命/万次
FSCB-0	0	105.1
FSCB-1	10.25	88.6
FSCB-3	22.16	77.9
FSCB-4	34.74	73.9

由表1可以看出:栓钉锈蚀率越高,组合梁疲劳寿命越短。这一研究表明应充分重视组合梁中栓钉及钢梁等钢构件的防腐保护,减少腐蚀对组合梁疲劳寿命的影响,提高组合梁的耐久性。

1.3 钢-混凝土组合梁疲劳破坏形态

由于组合梁疲劳性能的影响因素众多,所以组合梁的疲劳破坏形态不是单一的,目前组合梁的疲劳破坏形态主要表现为栓钉剪切破坏、钢梁断裂破坏和混

凝土压碎破坏。

对于带栓钉的组合梁而言,其主要疲劳破坏形态是栓钉剪切破坏^[19-22]。李小珍等^[23]将以栓钉剪切破坏为表征的组合梁疲劳破坏分为 3 个阶段:第一阶段,部分剪力较大的栓钉发生疲劳损伤,但栓钉群的整体抗剪强度未发生变化;第二阶段,随着疲劳荷载持续作用,部分栓钉产生裂纹甚至断裂,栓钉群的抗剪性能明显下降;第三阶段,大部分栓钉被剪断,钢梁与混凝土板退出协同工作模式。

由于钢梁中的焊缝或受拉翼缘的切割边存在初始缺陷和残余应力,在疲劳荷载作用下,钢梁内部的微裂纹会沿受拉翼缘及腹板迅速发展,截面中性轴不断靠近混凝土板顶端,导致部分混凝土板受拉开裂。所以组合梁的疲劳破坏形态还会表现为钢梁断裂和混凝土压碎^[24-25]。

已有试验表明,由于开孔板刚性大,组合梁为完全抗剪连接,贯穿钢筋使开孔板中的混凝土不易开裂,而钢梁连接部位受焊缝质量、应力集中的影响,在荷载作用下会产生微裂纹,裂纹扩展最终导致钢梁断裂,所以带开孔板的组合梁破坏形态主要是钢梁断裂破坏^[26-27]。

1.4 新型钢—混凝土组合梁疲劳试验研究

随着组合梁设计理论的不完善以及施工工艺的进步,组合梁的结构形式也在不断创新发展,组合连续梁、新型组合梁等逐渐成为组合梁疲劳性能研究的热点。宗周红等^[28]对预应力钢—混凝土组合梁的疲劳性能进行疲劳试验,共设置 4 根组合梁,结果表明:施加预应力增强了钢梁的疲劳强度,界面的相对滑移使得正弯矩区的截面刚度退化,却加强了负弯矩区的截面刚度,组合梁最终发生疲劳破坏是由于混凝土严重开裂导致。

Balkos Kyle D^[29]等提出了一种新型组合梁,通过在混凝土板及钢梁中预留孔洞,由贯穿螺栓将两者组合在一起,疲劳试验表明:采用贯穿螺栓的组合梁疲劳性能优于采用栓钉连接的组合梁,这种可装配施工的新型组合梁将极大地促进桥梁快速施工的发展。

1.5 钢—混凝土组合梁混凝土板疲劳试验研究

混凝土桥面板的开裂问题一直是钢—混凝土组合梁桥的主要病害之一。其中重要的原因是混凝土桥面板直接遭受外部车轮荷载的疲劳作用产生疲劳裂缝,以及超重车辆局部轮载作用下导致开裂,对于组合连续梁桥来说,负弯矩区混凝土在疲劳荷载作用下开裂则更为严重。

为了提升组合梁中混凝土板的疲劳性能,提高配筋率、施加预应力以及采用两种不同混凝土通过特殊

连接方式(如齿状咬合等)共同作用等方法已经被应用于组合梁的设计和施工中,取得了良好的效果^[9,12-14]。杨勇等^[30]提出了一种新型组合桥面板,主要通过混凝土板中加入开孔钢板,并通过栓钉连接件与钢梁组合在一起。通过对这种新型组合梁进行疲劳试验表明,应力幅依旧是影响其疲劳性能的主要因素,处于正负弯矩区的组合梁表现出不同的疲劳破坏形态,其中正弯矩区组合梁疲劳破坏形态为钢梁断裂破坏,进而导致受压区混凝土被压碎,而负弯矩区组合梁未发生疲劳破坏,表现出良好的疲劳性能。

邢颖^[31]通过向混凝土中掺入橡胶集料以提高混凝土板的疲劳性能,试验表明:掺入橡胶集料的混凝土板在加载初期基本没有裂缝产生,当栓钉群中大部分栓钉被剪断时,橡胶集料混凝土板依旧只有很少的裂缝,这说明掺入橡胶集料增加了混凝土的延性,提升了混凝土的疲劳强度,并能有效控制混凝土的开裂,进而提升组合梁的整体抗疲劳性能。

随着超高性能混凝土(UHPC)在中国应用日益广泛,这为解决组合梁混凝土板的疲劳问题提供了新的思路。邵旭东等^[32]提出了钢—超高性能混凝土轻型组合梁结构,通过疲劳试验发现,UHPC 层具有良好的抗疲劳性能,不易产生疲劳裂缝,可显著延长组合梁的疲劳寿命。

2 组合梁有限元疲劳分析研究

早期对于钢—混凝土组合梁疲劳性能的研究往往遵循“完全依赖试验、数理统计回归”的思想,由于组合梁疲劳性能的影响因素众多,疲劳试验结果具有很大的离散性,通过统计回归得到的研究结论在应用推广中具有局限性。而有限元理论已广泛应用于结构分析的各个领域,这为弥补疲劳试验的不足,进一步深入研究组合梁疲劳性能提供了新途径。

国内外学者提出了多种考虑滑移效应的组合梁有限元模型以及非线性分析方法,已应用于静动载下组合梁的计算与分析中。由于进行组合梁疲劳性能有限元分析时,要考虑荷载之间的非线性关系、混凝土疲劳特性、以及连接件与钢梁疲劳裂纹扩展的模拟等,目前针对组合梁疲劳性能的有限元分析还比较少。

2.1 带栓钉的组合梁有限元疲劳分析

现有研究中有限元模型主要采用接触面耦合自由度的方法使钢梁与混凝土完全相连,或者采用 Ansys 软件中的 Combin39 单元来模拟栓钉连接件,并采用

“生死单元”模拟混凝土的开裂,通过在集中荷载处施加垫板来解决应力集中问题,最终利用 Ansys 软件中的 Fatigue 模块进行后处理^[33-34]。

姜绍飞^[35]利用 Ansys 软件建立组合梁有限元模型,疲劳分析表明:提高混凝土配筋率和抗压强度可提高组合梁的疲劳寿命;李晓静、张大付等^[36-37]利用 Ansys 软件分析组合梁疲劳性能的影响因素,结果表明:组合箱梁在特定加载条件下疲劳寿命随混凝土强度、混凝土翼板厚度、钢梁高度的增加而增加,随组合箱梁栓钉间距的增加而减小,组合箱梁混凝土翼缘板厚度及跨度的改变对组合箱梁疲劳性能影响很大,混凝土强度及钢梁高度对组合梁疲劳性能影响较小,建议对承受动力荷载的大跨度组合梁通过增加混凝土翼板厚度来提高组合箱梁的疲劳性能。

疲劳荷载作用下连接件或钢梁的连接部位对于初始裂纹缺陷是非常敏感的,由于其承受拉压循环应力,将导致裂纹萌生、扩展至最终断裂,传统的有限元疲劳分析方法并不适合解决这一问题,王一泓^[38]采用扩展有限元法分析组合梁中栓钉的疲劳损伤,扩展有限元体现了良好的适应性。

2.2 带开孔板的组合梁有限元疲劳分析

对待开孔板连接件的组合梁进行有限元疲劳分析时,主要在 Abaqus 软件中建立组成部件的实体单元,通过定义不同的接触关系来建立有限元模型。刘斌^[39]通过有限元疲劳分析表明:随着开孔板板厚增加,组合梁疲劳寿命提高;随着转折角度增加,组合梁疲劳寿命降低;邹韵^[40]对采用 PBL 连接件的组合梁进行有限元疲劳分析表明,开孔板中设置贯穿钢筋可提升组合梁抗疲劳性能,控制贯穿钢筋直径与孔洞孔径的比值,可提高连接件疲劳强度。

3 结论

通过对已有文献回顾可以看出,应力幅、抗剪连接度及混凝土板疲劳强度是组合梁疲劳性能的主要影响因素,其他因素如低温、栓钉锈蚀等对组合梁疲劳性能也有影响;组合梁的疲劳破坏形态主要表现为栓钉剪切破坏、钢梁断裂破坏及混凝土压碎破坏;对于组合连续梁,正负弯矩区的组合梁性能截然不同,在疲劳设计时需要引起重视;组合梁混凝土板中掺入橡胶集料或采用超高性能混凝土可显著提升其疲劳性能;进行组合梁有限元疲劳分析时,多采用 Ansys 软件中的 Combin39 单元来模拟栓钉连接件,通过定义实体单

元间的接触关系模拟开孔板连接件。

但就目前组合梁疲劳性能的研究水平来看,疲劳试验中还存在理论应用滞后、试验方法单一等问题,利用有限元进行疲劳分析还很少,以下几个方面还需进一步深入研究:

(1) 对于公路桥梁来说,车辆荷载往往是随机的。目前疲劳试验多采用常幅加载,忽略了荷载次序间的相互作用,特别是过载对桥梁疲劳损伤的影响被弱化,今后应探索采用随机荷载加载方式,使组合梁试验荷载工况更贴合实际,以研究过载对组合梁疲劳损伤的影响规律。

(2) 目前多是基于疲劳试验中连接件的应力幅值对组合梁进行寿命预测,没有考虑混凝土开裂与钢梁裂纹扩展对组合梁疲劳寿命的影响,今后应在疲劳试验中引入声发射、红外检测、激光扫描检测等技术,对混凝土及钢梁的疲劳损伤进行定量计算,并通过构建考虑混凝土、钢梁与连接件相互影响的组合梁非线性疲劳累积损伤模型,揭示组合梁循环应力、疲劳裂纹扩展、疲劳损伤度之间的内在联系。

(3) 现有组合梁的疲劳性能研究过多依赖疲劳试验,应向“辅助适量试验,强化分析预测”的思想转变,加强有限元技术在组合梁疲劳分析中的应用,研究组合梁精细化建模方法,结合断裂力学理论与扩展有限元技术,完善组合梁疲劳寿命预测方法。

(4) 利用多尺度理论将现有研究尺度下沉至微观尺度,对混凝土开裂及钢梁微裂纹扩展导致组合梁结构失效的跨尺度疲劳破坏机理进行深入研究,发展基于检测或监测数据的桥梁疲劳评估理论与方法,建立组合梁桥梁疲劳损伤预警机制。

参考文献:

- [1] 黄侨. 桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M]. 2版. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [2] 李兆霞,王莹. 在役桥梁结构疲劳监测与评估[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [3] 聂建国,王宇航. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究综述[J]. 工程力学,2012,29(6):1-11.
- [4] ROBERTS T M, Dogan O. Fatigue of Welded Stud Shear Connectors in Steel-Concrete-Steel Sandwich Beams[J]. Journal of Constructional Steel Research,1998,45(3):301-320.
- [5] 福州大学,武汉理工大学,重庆交通大学,等. 高等桥梁结构试验[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [6] 彭国荣. 钢-混凝土组合梁疲劳性能的试验研究[D]. 北京:北京市市政工程研究院,2003.

- [7] KRIGE G J, MAHACHI J. Dynamic Behaviour of Composite Floors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 34(2-3): 249-269.
- [8] PEDRO Albrecht. Fatigue Strength of Prestressed Composite Steel-Concrete Beams[J]. American Society of Civil Engineers, 1995, 121(12): 1 850-1 856.
- [9] 李建军. 钢-混凝土组合梁疲劳性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [10] RICHARD Yen J Y, LIN Yiching, LAI M T. Composite Beams Subjected to Static and Fatigue Loads[J]. American Society of Civil Engineers, 1997, 123(6): 765-771.
- [11] 刘小洁, 李亚平, 刘亚茹, 等. 钢-混凝土组合箱梁的抗弯疲劳性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1 123-1 129.
- [12] AYMAN El-Zohairy, HANI Salim, AARON Saucier. Fatigue Tests on Steel-Concrete Composite Beams Subjected to Sagging Moment [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 145(5): 1-11.
- [13] 林广泰. 部分抗剪连接钢-混凝土组合梁疲劳性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [14] 长沙铁道学院. 芜湖桥桁架结合梁试验研究[R], 1999.
- [15] AYMAN El-Zohairy, HANI Salim, AARON Saucier. Steel-Concrete Composite Beams Strengthened with Externally Post-Tensioned Tendons under Fatigue [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(5): 1-9.
- [16] YOUN Seok-Goo, CHANG Sung-Pil. Behavior of Composite Bridge Decks Subjected to Static and Fatigue Loading [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(3): 249-258.
- [17] 侯文崎, 叶梅新. 低温下钢-混凝土组合结构疲劳试验和极限承载力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004(6): 1 025-1 030.
- [18] 张海鹏, 陈驹, 金伟良, 等. 栓钉锈蚀的钢-混凝土组合梁疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 89-95.
- [19] IZUMI Misuaki, YAMADERA Noriaki. Behaviour of Steel Reinforced Concrete Members under Torsion and Bending Fatigue[C]. International Association for Bridge and Structural Engineering, Iabse Symposium Brussel, 1990, 60: 265-266.
- [20] WANG Yuhang, NIE Jianguo, LI Jianjun. Study on Fatigue Property of Steel-Concrete Composite Beams and Studs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 1-10.
- [21] LIU Ruyue, YANG Yong, ZHOU Xianwei. Experimental Study on Fatigue Performance of Composite Beam with Steel-Plate-Concrete Composite Decks[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 833-849.
- [22] SHIN C S, KIM J H, CHAN S P, et al. The Behavior of Shear Connections in a Composite Beam with a Full-Depth Precast Slab[J]. Proc. Instn Civ. Engrs & Bldgs, 2000, 140: 101-110.
- [23] 李小珍, 谭清泉, 肖林. 钢-混凝土组合梁疲劳性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(6): 12-17.
- [24] 史路军. 简支钢-混凝土组合梁的疲劳试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2009.
- [25] 刘自明, 汪双炎, 童智洋. 结合梁负弯矩区模型试验研究[J]. 钢结构, 2001, 16(5): 35-38.
- [26] MASAHAIDE Takagi, SHIGEYUKE Matsui. Design Method and Fatigue Strength of Large-Span Concrete Filled I-Beam Grid Deck [C]. Composite Construction-Conventional and Innovative, Conference Report, International Conference, Innsbruck, Austria, 1997.
- [27] 汪炳. 基于疲劳累积损伤效应的钢-混凝土组合梁桥剩余力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [28] 宗周红, 车惠民. 预应力钢-混凝土组合梁的疲劳性能[J]. 铁道学报, 2000, 22(3): 92-95.
- [29] BALKOS Kyle D, SJAARDA Matthew, WEST Jeffrey S. Static and Fatigue Tests of Steel-Precast Composite Beam Specimens with Through-Bolt Shear Connectors[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(5): 04019036. 1-04019036, 12.
- [30] 杨勇, 周现伟, 薛建阳, 等. 带钢板-混凝土组合桥面板的组合梁疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 123-131.
- [31] 邢颖. 橡胶集料混凝土-钢组合梁静力与疲劳性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [32] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [33] 侯文崎. 铁路钢-混凝土组合桥及剪力连接件的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [34] 林新. 重复荷载作用下钢-混凝土组合梁的长期性能分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [35] 姜绍飞, 王鹏, 吴兆旗. 钢-混凝土组合梁疲劳性能的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1): 111-115.
- [36] 李晓静. 钢-混凝土组合箱梁疲劳性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [37] 张大付, 余志武. 钢-混凝土组合箱梁疲劳性能的有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(2): 309-316.
- [38] 王一泓. 橡胶集料混凝土与钢组合梁试验研究与精细化数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [39] 刘斌. 开孔波折板连接的弹性混凝土-钢组合梁疲劳性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [40] 邹韵. 开孔板连接件的静力和抗疲劳性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.